



Научная статья / Original Article

УДК 621.396

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188114>

EDN: <https://www.elibrary.ru/UOEHNP>

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЯЗИ С ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ СРЕДСТВАМИ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ

**И.В. Галактионов<sup>1,2</sup>✉, В.В. Топоровский<sup>1</sup>, О.В. Колесников<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Московский технический университет связи и информатики,

<sup>2</sup>Московский политехнический университет,

г. Москва, Россия

✉ [ilya.galaktionoff@gmail.com](mailto:ilya.galaktionoff@gmail.com)

---

**Цитирование:** Галактионов И.В., Топоровский В.В., Колесников О.В. Повышение эффективности связи с летательными аппаратами средствами адаптивной оптики // Труды МАИ: электрон. журнал. № 147. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188114>

---

**Аннотация.** В последние годы беспилотные летательные аппараты, или дроны, стали неотъемлемой частью многих сфер деятельности: от мониторинга инфраструктуры и доставки грузов до обеспечения безопасности и съемки контента. Традиционно связь с дроном для передачи команд телеметрии и полезной информации осуществляется по радиоканалу с базовой станцией. Однако в условиях плотной городской застройки радиочастотный спектр перегружен, подвержен помехам и может быть уязвим с точки зрения безопасности. Альтернативой или дополнением к радиочастотам может стать оптическая связь, но и здесь есть серьезное препятствие — турбулентность атмосферы, которая искажает лазерный пучок. В настоящей работе для решения задачи высокоточной передачи сигнала на дрон в городских условиях предлагается использование методов адаптивной оптики. Данная технология позволяет компенсировать искажения волнового фронта в реальном времени, обеспечивая стабильный канал связи. Разработанный алгоритм управления был

протестирован в условиях, имитирующих реальную турбулентность. Результаты показали высокую эффективность предложенного подхода. Применение адаптивной оптики позволяет значительно улучшить фокусировку излучения: общая мощность пучка, фокусируемого в оптоволокно диаметром 10 мкм, может быть увеличена с 0,33 мВт до 2,3 мВт. Помимо энергетических характеристик, существенно улучшается и качество самого пучка: среднеквадратичное отклонение волнового фронта (параметр, характеризующий уровень аберраций) снижается с 0,63 мкм до 0,12 мкм. Достигнутые показатели качества пучка напрямую влияют на эффективность системы передачи информации. Согласно численным оценкам, проведенным на основе полученных данных, коррекция волнового фронта позволит повысить эффективность связи (coupling efficiency), то есть долю света, попадающего в приемный тракт летательного аппарата, с 0,1 до 0,6. Таким образом, интеграция адаптивной оптики в системы управления беспилотных летательных аппаратов открывает перспективы для создания помехозащищенных и высокоскоростных каналов связи следующего поколения.

**Ключевые слова:** летательные аппараты; лазерная связь; адаптивная оптика; датчик волнового фронта; аберрации оптических систем.

---

## OPTICAL LINK EFFICIENCY INCREASE WITH THE UNNAMED AERIAL VEHICLES USING ADAPTIVE OPTICS

I.V. Galaktionov<sup>1,2</sup>✉, V.V. Toporovsky<sup>1</sup>, O.V. Kolesnikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow technical university of communications and informatics,

<sup>2</sup>Moscow Polytechnic University,

Moscow, Russia

✉[ilya.galaktionoff@gmail.com](mailto:ilya.galaktionoff@gmail.com)

---

**Citation:** Galaktionov I.V., Toporovsky V.V., Kolesnikov O.V. Optical link efficiency increase with the unnamed aerial vehicles using adaptive optics // Trudy MAI. 2026. No. 147. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188114>

---

**Abstract.** In recent years, unmanned aerial vehicles (UAVs), or drones, have become essential for numerous applications, from infrastructure monitoring and delivery

services to public safety and surveillance. Traditionally, communication between a ground control station and a drone—for transmitting commands and data—relies on radio frequency bands. However, in dense urban environments, the RF spectrum is congested, susceptible to interference, and can be vulnerable to security breaches. This makes relying solely on radio links problematic. Optical wireless communication presents a compelling alternative, offering high bandwidth and enhanced security. Yet, it faces a major obstacle in the lower atmosphere: turbulence. Variations in air temperature and pressure distort the laser beam's wavefront, causing signal fading and degrading link reliability. To overcome this, our work proposes using adaptive optics techniques to maintain a robust optical link with a UAV in urban conditions. Adaptive optics provides a means to measure and correct these optical distortions in real-time.

We developed and tested a control algorithm specifically for this dynamic scenario. In laboratory experiments simulating realistic atmospheric turbulence, the proposed AO system demonstrated substantial improvements. By actively correcting the aberrated wavefront, the system dramatically enhanced the focusing of the incoming laser beam. The total power coupled into a standard optical fiber with a 10-micrometer core—a key metric for efficient signal detection—was increased nearly sevenfold, from 0.33 mW to 2.3 mW. Furthermore, the beam quality was significantly refined: the root mean square (RMS) wavefront error was effectively reduced from 0.63 micrometers to just 0.12 micrometers, bringing the beam much closer to its ideal state. These physical improvements directly impact data transmission performance. Based on our experimental results, numerical analyses indicate that applying adaptive optics would dramatically boost the coupling efficiency—the fraction of received light successfully coupled into the detector—from a marginal 0.1 to an impressive 0.6. This increase translates directly to a higher signal-to-noise ratio, enabling higher data rates or longer operational ranges. In conclusion, integrating adaptive optics into UAV communication systems offers a powerful pathway for developing the next generation of secure, high-speed, and resilient data links essential for the future of advanced drone operations in challenging urban environments.

**Keywords:** unnamed aerial vehicles; laser communications; adaptive optics; wavefront sensor; optical system aberrations.

---

## Введение

Беспилотные летательные аппараты (дроны) в последнее время набирают всё большую популярность и используются как для военных, так и для гражданских целей. К примеру, на сегодняшний день стоит задача управления дронами в городских условиях для отслеживания дорожной ситуации, выявления заторов, аварий на дорогах, а также для увеличения скорости реагирования служб экстренной помощи в чрезвычайных ситуациях [1-4]. Связь с дроном для отслеживания его местоположения, передачи информации и управляющих сигналов осуществляется с базовой станции, однако использование для этих целей радиочастотного диапазона не всегда возможно и даже нежелательно из соображений безопасности [5-7].

В настоящее время ведется множество исследований в области развития оптических каналов связи, поскольку они не только предоставляют возможность передачи данных труднодоступным объектам (к примеру, расположенным в горах, на островах, воздухе или даже в космосе), но и широко применяются для переноса зашифрованной информации (включая квантовую). На сегодняшний день эффективность передачи информации по оптическому каналу остается неоправданно низкой [8-10]. В первую очередь, это связано с наличием неоднородностей в оптическом канале (вызванных эффектами атмосферной турбулентности и аэрозольного рассеяния), которые вносят в световой сигнал искажения, вследствие чего часть излучения, а, следовательно, и информации, не достигает приёмника, расположенного на дроне [11-14]. Известно, что наличие рассеивающей среды, в частности, атмосферного аэрозоля, приводит к возникновению амплитудных и фазовых флуктуаций в пучке. В результате значение интенсивности и плотности мощности при фокусировке излучения уменьшается. Таким образом, необходимо учитывать влияние параметров канала распространения (рассеивающей среды) на изменение характеристик рассеянного света [15-19].

В настоящей работе проведены исследования и определена степень влияния атмосферных феноменов на эффективность систем оптической связи с дронами для определения необходимости улучшения качества беспроводной

коммуникации. Был разработан алгоритм коррекции искажений оптического излучения, влияющий на качество оптической связи.

### Экспериментальная установка

Принципиальная схема экспериментальной установки для тестирования разработанного алгоритма представлена на рисунке 1.

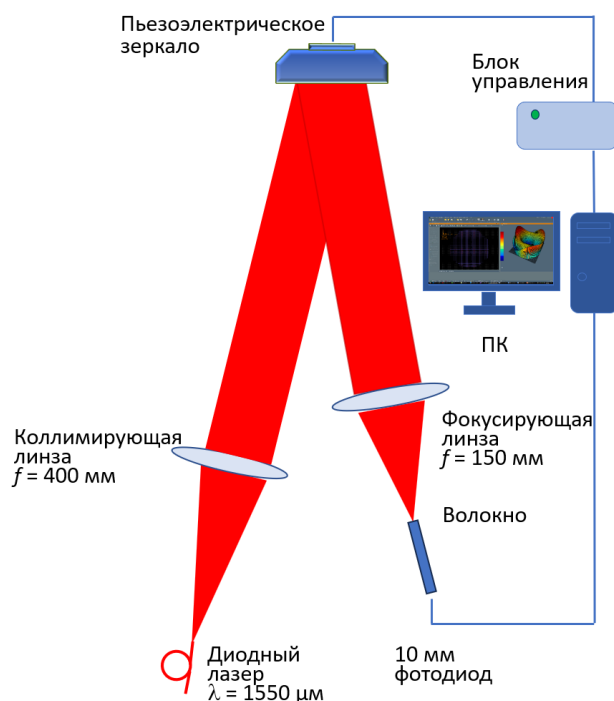


Рисунок 1 – оптическая схема коррекции аберраций (рисунок составлен авторами)

Лазерный диод с длиной волны  $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$ , соединённый с одномодовым волокном с числовой апертурой  $NA = 0,14$  и диаметром модового поля  $MFD = 10,4 \text{ мкм}$ , коллимируется ахроматической линзой с фокусным расстоянием  $f = 400 \text{ мм}$  в пучок диаметром 45 мм. Пучок распространяется вдоль оптической скамьи на расстояние 2 м и отражается от фазового модулятора диаметром 50 мм, имеющего 42 управляющих элемента. Затем пучок собирается приёмным телескопом, состоящим из ахроматической линзы диаметром 50,8 мм и фокусным расстоянием  $f = 150 \text{ мм}$ , которая фокусирует его в диафрагму волокно 10 мкм. Мощность, собранная волокном в реальной системе, фиксируется измерителем мощности. Полученный сигнал обрабатывается программным обеспечением, которое вычисляет функцию качества и использует её для определения управляющих сигналов на фазовом модуляторе [20-22].

Комбинированный алгоритм, используемый в данном исследовании, объединяет преимущества стохастических алгоритмов и методов градиентного спуска. Алгоритм работает в двух режимах. Сначала стохастический компонент быстро максимизирует функцию качества, достигая заданного оптимального порога (этот процесс будет подробно рассмотрен далее в работе). Затем активируется компонент градиентного спуска для дальнейшего уточнения и улучшения полученных результатов [23,24].

В случаях, когда значение функции качества перестаёт расти или даже снижается, стохастический алгоритм снова запускается для возобновления процесса оптимизации. Логика такого переключения режимов заключается в том, что стохастический компонент действует как быстрый механизм грубой настройки, а компонент градиентного спуска выполняет более медленную и точную окончательную подстройку. Такой двухрежимный подход особенно эффективен в ситуациях, где отсутствуют быстрые динамические искажения волнового фронта. Блок-схема, иллюстрирующая структуру и работу комбинированного алгоритма, представлена на Рисунке 2.

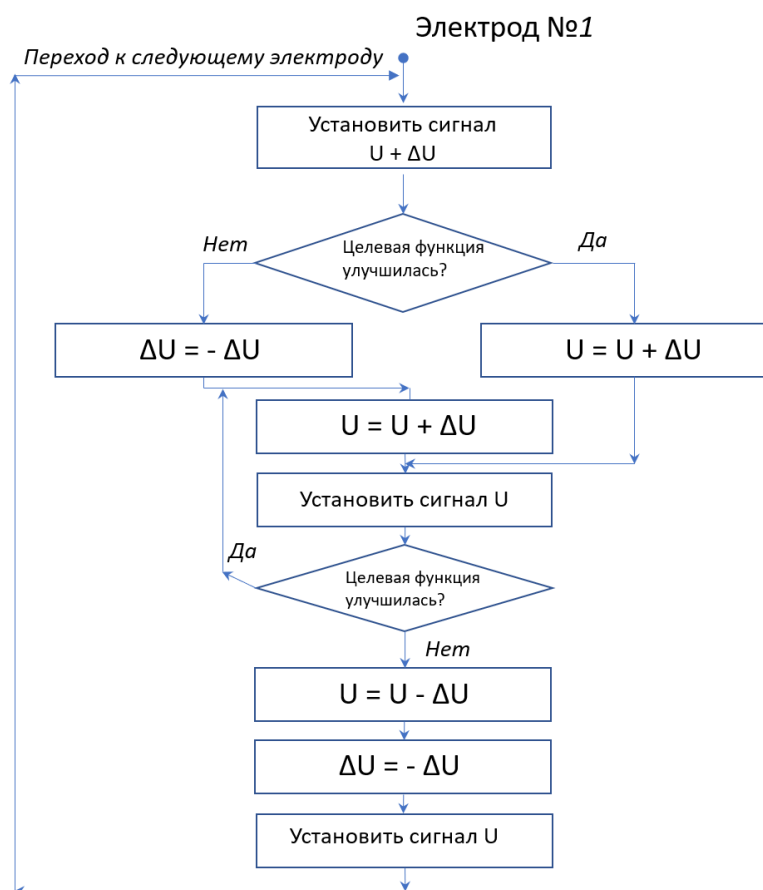


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма (рисунок составлен авторами)

## Применение разработанного комбинированного алгоритма коррекции фазовых флуктуаций

В первую очередь запускается стохастический этап алгоритма. Изначально вычисляется вектор случайных управляющих сигналов, равномерно распределённых в интервале  $[0; 1]$  и масштабированных с помощью предустановленной амплитуды рандомизации. Чтобы внести разреженность в вектор, применяется распределение Бернулли: часть элементов вектора обнуляется в соответствии с заданным коэффициентом в интервале  $(0; 1)$ . Рассчитанные векторы приращения и уменьшения последовательно подаются на управляющие элементы фазового модулятора, после чего вычисляются соответствующие значения целевой функции. Целевая функция определяется как значение сигнала, полученного с фотодиода.

Наконец, производится оценка полученного значения целевой функции. Если это значение оказывается ниже заданного порога, стохастическая процедура повторяется. Если же порог достигнут или превышен, этап грубой настройки завершается, что позволяет перейти к фазе точной подстройки с использованием алгоритма градиентного спуска.

Псевдокод разработанного алгоритма приведён ниже.

```
Calculate a vector  $\Delta X_t = \varepsilon_t \cdot A_R$ ;  
Zero part of a vector  $\Delta X_t = \Delta X_t \odot \text{Bernoulli}$ ;  
Calculate a vector  $\Delta X_{(t+)} = X_t + \Delta X_t$ ;  
Set vector  $\Delta X_{(t+)}$  signals to the PM;  
Calculate a merit function  $f_{(i+)}(x)$ ;  
Calculate a vector  $\Delta X_{(t-)} = X_t - \Delta X_t$ ;  
Set vector  $\Delta X_{(t-)}$  signals to the PM;  
Calculate a merit function  $f_{(i-)}(x)$ ;  
Calculate a correlation parameter  $\eta_t$ ;  
Calculate a vector  $X_t = X_t + \Delta X_t \odot \eta_t$ ;  
Set vector  $X_t$  signals to the PM;  
Calculate a merit function  $f_i(x)$ ;  
IF ( $f_i(x) < \text{Threshold}$ )
```

```

GOTO: #1
ELSE IF (DelayCounter < DelayCounterThreshold)
    DelayCounter++;
ELSE
    // Initiate gradient descent stage
    Calculate a vector  $X_t = X_t + \Delta X_t$ ;
    Set vector  $X_t$  signals to the PM;
    Calculate a merit function  $f_i(x)$ ;
    IF (IsBetter( $f_i(x)$ ))
        Calculate a vector  $\Delta X_{(t+)} = X_t + \Delta X_t$ ;
        Set vector  $\Delta X_{(t+)}$  signals to the PM;
        Calculate a merit function  $f_i(x)$ ;
        IF (IsBetter( $f_i(x)$ ))
            GOTO: #23
        ELSE
            Calculate a vector  $\Delta X_{(t-)} = X_t - \Delta X_t$ ;
            Set vector  $\Delta X_{(t-)}$  signals to the PM;
            Reverse the signal signs  $\Delta X_t = -\Delta X_t$ ;
            Calculate a merit function  $f_i(x)$ ;
            IF (IsBetter( $f_i(x)$ ))
                GOTO: #19
            ELSE
                GOTO: #1
        ELSE
            Reverse the signal signs  $\Delta X_t = -\Delta X_t$ ;
    GOTO: #23;

```

Что касается конкретных особенностей и новизны алгоритма, разработанный комбинированный алгоритм стохастического градиентного спуска обладает линейной временной (или вычислительной) сложностью  $O(N \cdot T)$  и линейной пространственной сложностью  $O(N)$ , где  $N$  — количество отсчетов (число управляющих элементов), а  $T$  — количество итераций, необходимых для

сходимости. Он также демонстрирует низкую чувствительность к вариациям входных параметров. Кроме того, его реализация относительно проста и не требует глубокого понимания базовой системы, в отличие от метода SPGD.

Разработанный подход с переключением режимов позволяет использовать стохастическую компоненту алгоритма в качестве быстрого механизма грубой настройки, а компоненту градиентного спуска — в качестве более медленного, но точного метода финальной подстройки. Такая двухрежимная работа особенно эффективна в условиях, где отсутствуют быстрые динамические искажения волнового фронта.

Изначально реализуется стохастическая фаза, так как она обеспечивает быструю сходимость и эффективно компенсирует большую часть ошибок волнового фронта, тем самым значительно увеличивая общую мощность, собираемую фотодиодом.

Как только порог мощности достигнут и волновой фронт стабилизируется в течение нескольких итераций алгоритма, активируется фаза градиентного спуска. Эта фаза позволяет добиться дальнейшего увеличения общей мощности. Однако, из-за своей изначально более медленной природы, она подвержена сбоям, если абберрации волнового фронта возрастают. Следовательно, если это происходит, и общая собираемая мощность падает ниже заранее заданного порога (примерно 2 мВт), стохастическая фаза запускается заново.

На рисунке 3 представлены среднеквадратичные (RMS) значения для каждой моды Цернике до и после коррекции с помощью фазового модулятора.

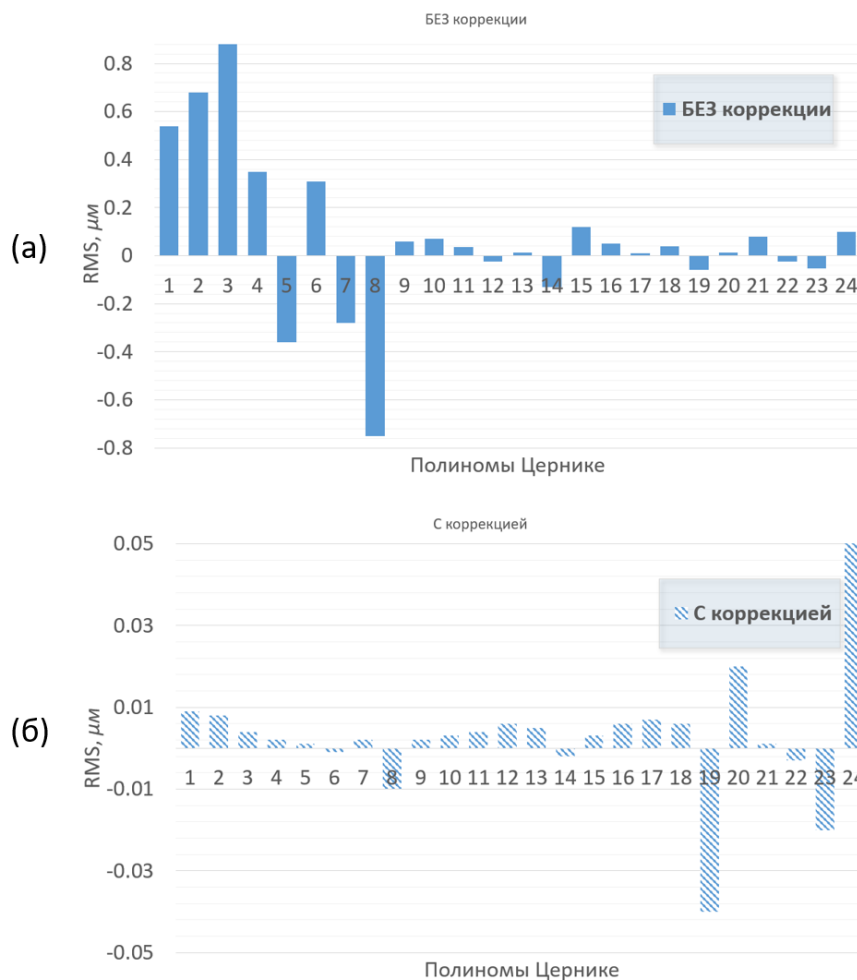


Рисунок 3 – Среднеквадратичное отклонение волнового фронта по полиномам Цернике.  
 (а) RMS до коррекции, (б) RMS после коррекции с помощью адаптивной оптической системы  
 (рисунок составлен авторами)

Алгоритм продемонстрировал способность увеличивать общую мощность пучка, фокусируемого в 10-мкм волокно, повысив значение с 0,33 мВт до 2,3 мВт. Кроме того, среднеквадратичное значение волнового фронта было уменьшено с 0,63 мкм до 0,12 мкм, что потенциально позволяет повысить эффективность ввода излучения с 0,1 до 0,6.

### Выводы

В ходе выполнения работы был разработан и экспериментально апробирован алгоритм управления для систем адаптивной оптики, ориентированный на решение задачи высококачественной передачи информации на беспилотные летательные аппараты. Комбинированный алгоритм включает элементы стохастического метода и метода градиентного

спуска и предназначен для фокусировки лазерного пучка в волокно 10 мкм. Новизна предложенного подхода заключается в адаптации методов коррекции волнового фронта к условиям динамически меняющейся атмосферной турбулентности, характерной для городской среды и нижних слоев атмосферы, что отличает его от традиционных решений, применяемых в стационарных астрономических комплексах. Актуальность разработки продиктована возрастающими требованиями аэрокосмической отрасли к помехозащищенности, пропускной способности и скрытности каналов связи с летательными аппаратами различного класса.

Разработанный алгоритм обладает линейной временной и пространственной сложностью и демонстрирует низкую чувствительность к вариациям входных параметров. Более того, его реализация относительно проста и не требует глубокого понимания базовой системы, в отличие от метода SPGD. Кроме того, разработанный подход с переключением режимов позволяет использовать стохастическую компоненту алгоритма в качестве быстрого механизма грубой настройки, а компоненту градиентного спуска — в качестве более медленного, но точного метода окончательной подстройки. Такая двухрежимная работа особенно эффективна в условиях, где отсутствуют быстрые динамические искажения волнового фронта.

Разработанный алгоритм продемонстрировал высокую эффективность в ходе численного моделирования и экспериментов. Применение методов адаптивной оптики может позволить увеличить общую мощность пучка, фокусируемого в 10-мкм волокно, с 0,33 мВт до 2,3 мВт. Одновременно с этим среднеквадратичное значение ошибки волнового фронта может быть снижено с 0,63 мкм до 0,12 мкм.

Практическая значимость работы заключается в прямом влиянии полученных результатов на эффективность управления и передачи информации на дроны. Согласно проведенным оценкам, применение разработанного алгоритма позволит повысить эффективность связи (coupling efficiency) с 0,1 до 0,6. Такое улучшение означает увеличение дальности связи и обеспечение стабильного канала управления даже в условиях плотной городской застройки.

Таким образом, разработанный алгоритм создает технологическую основу для создания надежных, высокоскоростных и защищенных линий связи следующего поколения, необходимых для интеграции беспилотных авиационных систем в единое воздушное пространство и решения перспективных задач аэрокосмической отрасли.

---

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

### **Список источников**

1. Domb M., Leshem G. Secured Key Distribution by Concatenating Optical Communications and Inter-Device Hand-Held Video Transmission // Appl. Syst. Innov. — 2020. — Т. 3. — №. 11. <https://doi.org/10.3390/ASI3010011>
2. Trung H.D. Performance of UAV-to-Ground FSO Communications with APD and Pointing Errors // Appl. Syst. Innov. — 2021. — Т. 4. — №. 65. <https://doi.org/10.3390/ASI4030065>.
3. Zych M., Costa F., Pikovski I., Ralph T.C., Brukner Č. General relativistic effects in quantum interference of photons. Class // Quantum Gravity. — 2012. — Т. 29. №. 224010. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/29/22/224010>.
4. Galaktionov I., Sheldakova J., Toporovsky V., Kudryashov A. Atmospheric Turbulence with Kolmogorov Spectra: Software Simulation, Real-Time Reconstruction and Compensation by Means of Adaptive Optical System with Bimorph and Stacked-Actuator Deformable Mirrors // Photonics 2023. - V. 10(10). - PP. 1147. <https://doi.org/10.3390/photonics10101147>
5. Nauerth S., Moll F., Rau M., Fuchs C., Horwath J., Frick S., Weinfurter H. Air-to-ground quantum communication // Nat. Photonics. — 2013. — Т. 7. — №ю 382–386. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.46>.
6. Badás M., Piron P., Bouwmeester J. Saathof R., Loicq J. Seidel optical aberrations and optimum truncated Gaussian beams on intersatellite free-space optical

communications // Opt. Express. — 2025. T. 33. — №. 33686.  
<https://doi.org/10.1364/OE.565652>.

7. Samarkin V., Alexandrov A., Galaktionov I., Kudryashov A., Nikitin A., Rukosuev A., Toporovsky V., Sheldakova J. Large-aperture adaptive optical system for correcting wavefront distortions of a petawatt Ti : sapphire laser beam // Quantum Electronics 2022. – V. 52(2). – PP. 187-194. <https://doi.org/10.1070/QEL17989>

8. Helsdingen W., Den Breeje R., Saathof R. Modeling the physical layer of air-to-space optical communication networks using the modified multi-scale method // J. Opt. Commun. Netw. — 2025. — T. 17. — 178–187. <https://doi.org/10.1364/JOCN.551182>.

9. Meyer J., Reches Y., Rozenman G.G., Oz Y., Suchowski H., Arie A. Analogy of free-space quantum key distribution using spatial modes of light: Scaling up the distance and the dimensionality // Opt. Lett. — 2025. — T. 50. — 3297–3300. <https://doi.org/10.1364/OL.557649>.

10. Galaktionov I., Kudryashov A., Sheldakova J., Nikitin A. Galaktionov I., Kudryashov A., Sheldakova J., Nikitin A. The use of modified hill-climbing algorithm for laser beam focusing through the turbid medium // Proc. SPIE 2017. – V. 10090. – PP. 100901K. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2257447>

11. Sisodia M., Omshankar Venkataraman V., Ghosh J. FSO-QKD protocols under free-space losses and device imperfections: A comparative study // Quantum Inf. Process. — 2024. — T. 23. — №. 185. <https://doi.org/10.1007/S11128-024-04382-1>.

12. Tomlinson W.J. Wagner R.E. Coupling efficiency of optics in single-mode fiber components // Appl. Opt. — T. 1982. №. 21. — 2671–2688. <https://doi.org/10.1364/AO.21.002671>.

13. Wang R., Wang Y., Jin C., Yin X., Wang S., Yang C., Cao Z., Mu Q., Gao S., Xuan L. Demonstration of horizontal free-space laser communication with the effect of the bandwidth of adaptive optics system // Opt. Commun. — 2019. — T. 431. — 167–173. <https://doi.org/10.1016/J.OPTCOM.2018.09.038>.

14. Galaktionov I., Kudryashov A., Sheldakova J., Nikitin A. Laser beam focusing through the dense multiple scattering suspension using bimorph mirror // Proc. SPIE 2019. – V. 10886. – PP. 1088619. <https://doi.org/10.1117/12.2509621>

15. Shanin O. Adaptive optical systems for tilt correction. In Resonant Adaptive Optics // Technosphaera. — 2013. — Moscow, Russia.
16. Hardy J.W. Adaptive Optics for Astronomical Telescopes (Oxford Series in Optical and Imaging Sciences) // Oxford University Press. — 1998. — Oxford, UK.
17. Vorontsov M.S. Adaptive Optics Principles // Nauka: Moscow, Russia. — 1985.
18. Bifano T., Cornelissen S., Bierden P. MEMS deformable mirrors in astronomical adaptive optics // In Proceedings of the 1st AO4ELT Conference— Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes, Paris, France, 22–26 June. — 2009. — 06003. <https://doi.org/10.1051/AO4ELT/201006003>.
19. Vorontsov M., Weyrauch T., Carhart G, Beresnev L. Adaptive Optics for Free Space Laser Communications // In Proceedings of the Lasers, Sources and Related Photonic Devices, San Diego, CA, USA. — 3 February 2010. — p. LSMA1. <https://doi.org/10.1364/LSC.2010.LSMA1>.
20. Wang Y. et al. Performance analysis of an adaptive optics system for free-space optics communication through atmospheric turbulence // Sci. Rep. — 2018. — T. 8. — 1124. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19559-9>.
21. Calvo R.M., Becker P., Giggenbach D., Moll F., Schwarzer M., Hinz M. Sodnik Z. Transmitter diversity verification on ARTEMIS geostationary satellite // In Proceedings of the Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVI, San Diego, CA, USA, 2–4 February 2014. —V. 8971. — pp. 24–37. <https://doi.org/10.1117/12.2036554>.
22. Wilcox C.C., Andrews J.R., Restaino S.R., Martinez T., Teare S.W. Atmospheric turbulence generator using a liquid crystal spatial light modulator // In Proceedings of the IEEE Aerospace Conference Proceedings, Big Sky, MT, USA, 3–10 March 2007. — <https://doi.org/10.1109/AERO.2007.353015>.
23. Devaney N. et al. Characterisation of MEMs mirrors for use in atmospheric and ocular wavefront correction // In Proceedings of the MEMS Adaptive Optics II, San Jose, CA, USA, 22–24 January 2008. — V. 6888. — PP. 17–26. <https://doi.org/10.1117/12.773641>.

24. Sheldakova J., Galaktionov I., Nikitin A., Rukosuev A., Kudryashov A. LC phase modulator vs. deformable mirror for laser beam shaping: What is better? // Proc. SPIE 2018. – V. 10774. – PP. 107740S. <https://doi.org/10.1117/12.2324260>

### References

1. Domb M., Leshem G. Secured Key Distribution by Concatenating Optical Communications and Inter-Device Hand-Held Video Transmission // Appl. Syst. Innov. — 2020. — T. 3. — №. 11. <https://doi.org/10.3390/ASI3010011>

2. Trung H.D. Performance of UAV-to-Ground FSO Communications with APD and Pointing Errors // Appl. Syst. Innov. — 2021. — T. 4. — №. 65. <https://doi.org/10.3390/ASI4030065>.

3. Zych M., Costa F., Pikovski I., Ralph T.C., Brukner Č. General relativistic effects in quantum interference of photons. Class // Quantum Gravity. — 2012. — T. 29. №. 224010. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/29/22/224010>.

4. Galaktionov I., Sheldakova J., Toporovsky V., Kudryashov A. Atmospheric Turbulence with Kolmogorov Spectra: Software Simulation, Real-Time Reconstruction and Compensation by Means of Adaptive Optical System with Bimorph and Stacked-Actuator Deformable Mirrors // Photonics 2023. – V. 10(10). – PP. 1147. <https://doi.org/10.3390/photonics10101147>

5. Nauerth S., Moll F., Rau M., Fuchs C., Horwath J., Frick S., Weinfurter H. Air-to-ground quantum communication // Nat. Photonics. — 2013. — T. 7. — №. 382–386. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.46>.

6. Badás M., Piron P., Bouwmeester J. Saathof R., Loicq J. Seidel optical aberrations and optimum truncated Gaussian beams on intersatellite free-space optical communications // Opt. Express. — 2025. T. 33. — №. 33686. <https://doi.org/10.1364/OE.565652>.

7. Samarkin V., Alexandrov A., Galaktionov I., Kudryashov A., Nikitin A., Rukosuev A., Toporovsky V., Sheldakova J. Large-aperture adaptive optical system for correcting wavefront distortions of a petawatt Ti : sapphire laser beam // Quantum Electronics 2022. – V. 52(2). – PP. 187-194. <https://doi.org/10.1070/QEL17989>

8. Helsdingen W., Den Breeje R., Saathof R. Modeling the physical layer of air-to-space optical communication networks using the modified multi-scale method // *J. Opt. Commun. Netw.* — 2025. — T. 17. — 178–187. <https://doi.org/10.1364/JOCN.551182>.
9. Meyer J., Reches Y., Rozenman G.G., Oz Y., Suchowski H., Arie A. Analogy of free-space quantum key distribution using spatial modes of light: Scaling up the distance and the dimensionality // *Opt. Lett.* — 2025. — T. 50. — 3297–3300. <https://doi.org/10.1364/OL.557649>.
10. Galaktionov I., Kudryashov A., Sheldakova J., Nikitin A. Galaktionov I., Kudryashov A., Sheldakova J., Nikitin A. The use of modified hill-climbing algorithm for laser beam focusing through the turbid medium // *Proc. SPIE 2017.* – V. 10090. – PP. 100901K. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2257447>
11. Sisodia M., Omshankar Venkataraman V., Ghosh J. FSO-QKD protocols under free-space losses and device imperfections: A comparative study // *Quantum Inf. Process.* — 2024. — T. 23. — №. 185. <https://doi.org/10.1007/S11128-024-04382-1>.
12. Tomlinson W.J. Wagner R.E. Coupling efficiency of optics in single-mode fiber components // *Appl. Opt.* — T. 1982. №. 21. — 2671–2688. <https://doi.org/10.1364/AO.21.002671>.
13. Wang R., Wang Y., Jin C., Yin X., Wang S., Yang C., Cao Z., Mu Q., Gao S., Xuan L. Demonstration of horizontal free-space laser communication with the effect of the bandwidth of adaptive optics system // *Opt. Commun.* — 2019. — T. 431. — 167–173. <https://doi.org/10.1016/J.OPTCOM.2018.09.038>.
14. Galaktionov I., Kudryashov A., Sheldakova J., Nikitin A. Laser beam focusing through the dense multiple scattering suspension using bimorph mirror // *Proc. SPIE 2019.* – V. 10886. – PP. 1088619. <https://doi.org/10.1117/12.2509621>
15. Shanin O. Adaptive optical systems for tilt correction. In *Resonant Adaptive Optics* // Technosphaera. — 2013. — Moscow, Russia.
16. Hardy J.W. *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes (Oxford Series in Optical and Imaging Sciences)* // Oxford University Press. — 1998. — Oxford, UK.
17. Vorontsov M.S. *Adaptive Optics Principles* // Nauka: Moscow, Russia. — 1985.

18. Bifano T., Cornelissen S., Bierden P. MEMS deformable mirrors in astronomical adaptive optics // In Proceedings of the 1st AO4ELT Conference— Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes, Paris, France, 22–26 June. — 2009. — 06003. <https://doi.org/10.1051/AO4ELT/201006003>.
19. Vorontsov M., Weyrauch T., Carhart G, Beresnev L. Adaptive Optics for Free Space Laser Communications // In Proceedings of the Lasers, Sources and Related Photonic Devices, San Diego, CA, USA. — 3 February 2010. — p. LSMA1. <https://doi.org/10.1364/LSC.2010.LSMA1>.
20. Wang Y. et al. Performance analysis of an adaptive optics system for free-space optics communication through atmospheric turbulence // Sci. Rep. — 2018. — T. 8. — 1124. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19559-9>.
21. Calvo R.M., Becker P., Giggenbach D., Moll F., Schwarzer M., Hinz M. Sodnik Z. Transmitter diversity verification on ARTEMIS geostationary satellite // In Proceedings of the Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVI, San Diego, CA, USA, 2–4 February 2014. —V. 8971. — pp. 24–37. <https://doi.org/10.1117/12.2036554>.
22. Wilcox C.C., Andrews J.R., Restaino S.R., Martinez T., Teare S.W. Atmospheric turbulence generator using a liquid crystal spatial light modulator // In Proceedings of the IEEE Aerospace Conference Proceedings, Big Sky, MT, USA, 3–10 March 2007. — <https://doi.org/10.1109/AERO.2007.353015>.
23. Devaney N. et al. Characterisation of MEMs mirrors for use in atmospheric and ocular wavefront correction // In Proceedings of the MEMS Adaptive Optics II, San Jose, CA, USA, 22–24 January 2008. — V. 6888. — PP. 17–26. <https://doi.org/10.1117/12.773641>.
24. Sheldakova J., Galaktionov I., Nikitin A., Rukosuev A., Kudryashov A. LC phase modulator vs. deformable mirror for laser beam shaping: What is better? // Proc. SPIE 2018. – V. 10774. – PP. 107740S. <https://doi.org/10.1117/12.2324260>

### **Информация об авторах**

**Илья Владимирович Галактионов**, руководитель сектора "Адаптивная оптика в квантовых и оптических коммуникациях" НИО Квантовый Центр

МТУСИ, доцент кафедры Физика Московского политехнического университета, г. Москва, Россия; e-mail: [ilya.galaktionoff@gmail.com](mailto:ilya.galaktionoff@gmail.com)

**Владимир Владимирович Топоровский**, инженер сектора "Адаптивная оптика в квантовых и оптических коммуникациях" НИО Квантовый Центр МТУСИ, г. Москва, Россия; e-mail: [toporovskii\\_v@mail.ru](mailto:toporovskii_v@mail.ru)

**Олег Вячеславович Колесников**, руководитель Квантового Центра МТУСИ, г. Москва, Россия; e-mail: [o.v.kolesnikov@mtuci.ru](mailto:o.v.kolesnikov@mtuci.ru)

### Information about the authors

**Ilya V. Galaktionov**, Head of the Sector "Adaptive Optics in Quantum and Optical Communications," Quantum Center, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Associate Professor, Department of Physics, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia; e-mail: [ilya.galaktionoff@gmail.com](mailto:ilya.galaktionoff@gmail.com)

**Vladimir V. Toporovsky**, Engineer, Sector "Adaptive Optics in Quantum and Optical Communications," Quantum Center, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russia; e-mail: [toporovskii\\_v@mail.ru](mailto:toporovskii_v@mail.ru)

**Oleg V. Kolesnikov**, Head of the Quantum Center, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russia; e-mail: [o.v.kolesnikov@mtuci.ru](mailto:o.v.kolesnikov@mtuci.ru)

---

Получено 14 февраля 2026 ● Принято к публикации 20 марта 2026 ● Опубликовано 30 апреля 2026  
Received 14 February 2026 ● Accepted 20 March 2026 ● Published 30 April 2026

---